

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.076



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



蜂窝夹层板的频散特性与高频导波传播规律

阎石, 陈修坤, 王雪南, 孟庆一

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

摘 要:脱粘分层是蜂窝夹层板(HSP)最典型的损伤形式,对HSP结构的整体性和安全性影响很大,然而,监测信号对脱粘分层不敏感。为了解决HSP变形等效模型的波动性能适用性和脱粘分层识别时传感信号特征提取困难等问题,利用等效换算法将HSP换算为3层板状周期性结构,利用Comsol Multiphysics计算并绘制频散曲线;通过对比HSP等效和实际两种有限元分析结果,阐明导波在两种模型中波动性能的适用性;利用FE方法研究导波的“脱粘式分流”特征;采用模型试验验证HSP的频散特性和高频导波“脱粘式分流”特征的正确性。结果表明,当导波波长不超过HSP蜂窝芯单胞边长时,等效换算法和实体建模法得到的波动性能差异显著,脱粘分层是造成导波“脱粘式分流”的主要原因,建议采用高频导波激励的 A_0 模态时域响应作为特征识别HSP的脱粘分层。

关键词:蜂窝夹层板;超声导波;频散特性;高频导波;波动性能;脱粘分层识别

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)05-0035-10

Frequency dispersion characteristics and high-frequency guided wave propagation of honeycomb sandwich panels

YAN Shi, CHEN Xiukun, WANG Xuenan, MENG Qingyi

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, P. R. China)

Abstract: Debonded delamination is a typical form of damage to honeycomb sandwich panels (HSPs), which can have a significant impact on the integrity and safety of HSP structures. However, monitoring signals are insensitive to the debonded delamination. In order to address the issues of the wave performance applicability of the deformation-based equivalent model for HSP structures and the difficulty in sensing signal feature extraction for debonded delamination identification, an equivalent conversion method is used by changing an HSP structure into a three-layered periodic structure, and the Comsol Multiphysics software is applied to calculate and draw frequency dispersion curves. The present study investigates the applicability of guided wave performance in the two models by comparing two kinds of finite element (FE) analysis results from the equivalent and actual models of the HSP structure. The FE method is employed to investigate the feature of the debonded-induced-split flow of guided waves. The model tests are used to validate the correctness of the frequency dispersion performance and the debonded-induced-split-flow feature of high-frequency guided waves. The findings indicate that the discrepancy in wave performance between the equivalent conversion and actual models is pronounced, given

收稿日期:2025-03-05

基金项目:国家自然科学基金(51278313)

作者简介:阎石(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事结构健康监测研究,E-mail:cesyan@sjzu.edu.cn。

Received: 2025-03-05

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51278313)

Author brief: YAN Shi (1962-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interest: structural health monitoring, E-mail: cesyan@sjzu.edu.cn.

that the wavelength of the guided wave is less than a single cell height in the HSP. The debonded delamination is the main reason for the debonded-induced-split flow, and it is recommended that the time-domain sensing signals of high-frequency activated A_0 mode guided waves are used as extracted features for the debonded delamination identification of HSP structures.

Keywords: honeycomb sandwich panels (HSPs); ultrasonic guided waves (UGWs); frequency dispersion characteristics; high-frequency guided wave; wave performance; debonded delamination identification

蜂窝夹层板(honeycomb sandwich panel, HSP)通常由上、下两层蒙皮之间夹一层蜂窝芯组成,并采用特殊粘接工艺将两层蒙皮分别与蜂窝芯牢固地粘接成型^[1],HSP结构示意图如图1所示。HSP结构因其高比强度、高比刚度和高能量吸收能力而被广泛应用于列车、航海及航空航天和土木工程等领域。然而,机械冲击或重复荷载容易导致HSP结构的蒙皮-蜂窝芯界面脱粘分层,威胁整个结构的完整性和安全性^[2]。传统脱粘分层的评估方法(红外热成像^[3]和CR射线检测^[4]等)耗时长、整体检测难、仪器笨重等,不适合直接应用于HSP结构的在线监测^[5]。

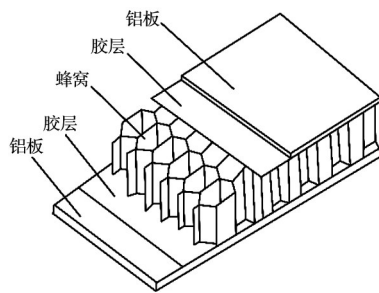


图1 HSP结构示意图

Fig. 1 Schematic of the HSP structure

与传统无损检测(nondestructive testing, NDT)技术相比,锆钛酸铅(lead zirconate titanate, PZT)与导波相结合的板状结构NDT技术可实现快速大面积检测,并具有实时、高效、可靠等特点。因此,利用导波监测HSP结构脱粘分层具有很大潜力。

导波在HSP结构中传播时具有显著的频散特性。通常采用夹芯板理论将蜂窝芯等效成均质等厚的正交各向异性板^[6],采用解析法或有限元(finite element, FE)法求解HSP结构频散方程和波动方程。其中,理论方法主要包括传递矩阵法^[7]和全局矩阵法^[8]。FE法有半解析FE方法^[9]、FE特征频率法^[10]、波导FE法^[11]等。相较于理论解法,FE法更为简单,通过导波在HSP结构中的传播分析,经后处理可计算群速度和相速度,并绘制频散曲线。然而,等效换算后HSP结构的频散特性是否与等效前一致的问题值得关注。

基于导波的HSP结构脱粘分层识别的关键是高效提取传感信号内含的损伤特征^[12]。局部脱粘分

层虽然未影响传感信号的总能量,但导波“分流”会引起特殊模态幅值的改变,体现出鲜明的分层特征。

笔者采用特征频率法计算并绘制等效HSP结构的频散曲线,分别用模拟和试验方法验证等效HSP结构频散特性的适用性,并研究导波在HSP中的传播规律,探讨利用“分流”导致 A_0 模态幅值变化进行脱粘分层识别的可行性。

1 HSP结构频散特性

1.1 HSP结构的等效换算

为了简化HSP结构的计算,采用夹芯板理论对其进行等效简化。将HSP的面板和蜂窝芯分开考虑,将蜂窝芯等效为服从Kirchhoff假设的均质薄板。根据Kirchhoff假设^[13]:

1) 直线假设,即变形前垂直于中面的直线,变形后仍垂直于弯曲后的中面,且其长度不因受力而发生改变。

2) 略去垂直于板面的正应力。

3) 板的中面上各点没有平行于中面的位移。

将蜂窝芯等效为正交各向异性均质等厚板(如图2)是为了保证蜂窝芯高度不变,且在代替前后沿每一个主方向的变形能力相同。在此条件下换算出弹性模量、剪切模量、泊松比和密度等参数。当蜂窝芯为正六边形时,等效参数按式(1)计算^[6]。

$$\begin{aligned}\rho_{\text{eq}} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\delta}{a} \rho_c \\ E_{cx} &= E_{cy} = \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{\delta}{a} \right)^3 \\ E_{cz} &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\delta}{a} E_c \\ \nu_{xy} &= 1 - 4 \left(\frac{\delta}{a} \right)^2 \\ G_{cxy} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\delta}{a} \right)^3 E_c \\ G_{cyz} &= G_{cxz} = \frac{\sqrt{3}}{3} \left(\frac{\delta}{a} \right) G_c\end{aligned}\quad (1)$$

式中: a 和 δ 分别为六边形单元的边长和壁厚; ρ_c 、 E_c 和 G_c 分别为蜂窝芯材料的密度、弹性模量和剪切模

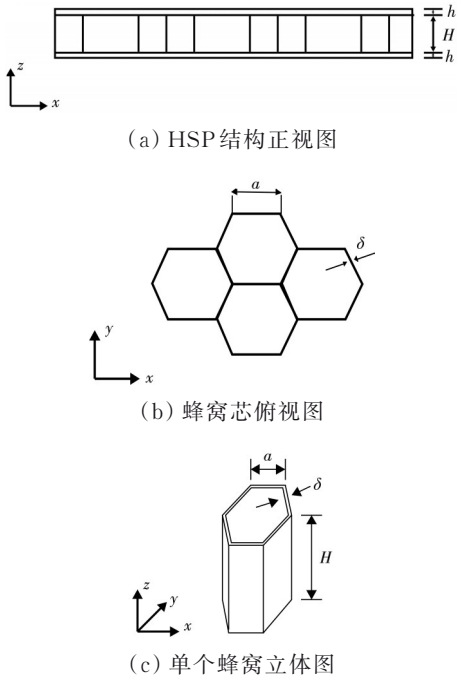


图2 HSP几何特征

Fig. 2 Geometric characteristics of the HSP

量; ρ_{ceq} 、 E_{cx} 、 E_{cy} 、 ν_{xy} 、 G_{cxy} 和 G_{cyz} 分别为蜂窝芯材料的等效密度、 x 方向的弹性模量、 y 方向的弹性模量、 xy 方向的泊松比、 xy 方向的剪切模量和 yz 方向的剪切模量。

夹芯板理论未给出 yz 和 xz 方向的泊松比 ν_{cyz} 和 ν_{cxz} ,但可参考Y模型理论进行计算。

$$\nu_{\text{cyz}} = \nu_{\text{cxz}} = \left(\frac{\delta}{a} \right)^3 \frac{3a^2 - 3\delta^2}{3a^2 + 5\delta^2} \quad (2)$$

1.2 周期结构与有限元模型

特征频率法的理论基础是固体物理中的周期结构理论^[12],该理论简化了导波传播的波动控制方程。Bloch-Floquet理论^[14]认为,波从一个单元传播到另一个单元并不取决于周期性晶格单元的位置,只需考虑一个基本单元即可描述波在整个周期性结构中的传播。在晶格振动时,完整晶体中的原子绕平衡位置的质点振动运动方程为

$$u_l^\alpha = e^{ik \cdot R_l} u_0^\alpha \quad (3)$$

式中: α 表示方向($\alpha=x, y, z$); l 表示某一个元胞; u_l^α 为 l 元胞沿着 α 方向的位移分量; u_0^α 为初始定义的元胞位移分量; R_l 为元胞的晶格平移矢量。对于每个确定的波矢量 k 值,运动方程式(3)的解均表现为各元胞中原子振动的方向相同且振幅相等,且具有特定的相位关系,按 $e^{ik \cdot R_l}$ 变化。

利用数值方法求解结构的自由振动方程问题,可以简化为求解特征方程

$$KU - \omega^2 MU = 0 \quad (4)$$

式中: ω 为结构的特征频率; U 为特征频率对应的位移矢量矩阵; K 为刚度矩阵; M 为质量矩阵。

联合式(3)和式(4),利用FE软件可以求出波矢量 k 和特征频率 ω 的对应关系,进而得到群速度和相速度随频率变化的对应关系,以表征其频散特性。

选取等效后HSP一个元胞的中心线以上的半结构为分析对象,根据周期结构特性,采用Comsol Multiphysics FE仿真软件建立2D模型,边界条件设置如图3所示。上表面采用自由边界,蒙皮和等效蜂窝芯的边界对采用应力和位移连续条件。下表面设置对称或反对称边界,分别用以求解相应的对称模态S和反对称模态A所对应的群速度和相速度。两侧采用Floquet周期边界,用以满足质点振动的运动方程式(3)。

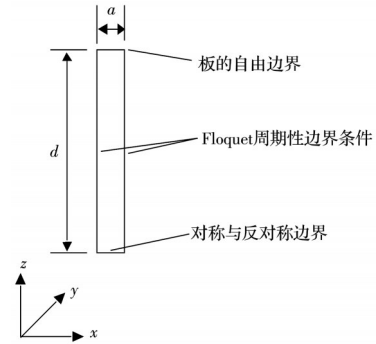


图3 元胞模型及边界条件

Fig. 3 Core model and boundary conditions

通过对单胞区域内波矢 k 的扫描,结合Comsol中的特征频率求解器,可以求解出波矢 k 和特征频率 ω 的对应关系。

1.3 模型验证

以文献[15]中的HSP结构为例,利用特征频率法计算并绘制频散曲线,通过比对验证FE模型和特征频率法的有效性。该HSP结构上下两层蒙皮为石墨编织层压板,HSP模型如图4所示。石墨编织层压板密度为 $1\,276\text{ kg/m}^3$,铝制蜂窝芯层等效密度为 114.1 kg/m^3 。蒙皮板材料参数和等效蜂窝芯材料参数^[15]分别如表1和表2所示。

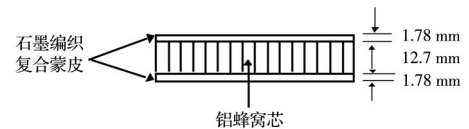


图4 HSP模型示意图

Fig. 4 Schematic of the HSP model

FE计算和参考文献[15]中得到的HSP结构相速度对比如图5所示。

由图5可见,采用周期性结构和FE方法计算并

表 1 蒙皮板材料参数

Table 1 Material parameters of the skin plate					
E_x/GPa	E_z/GPa	ν_{xy}	ν_{xz}	G_{xy}/GPa	G_{yz}/GPa
38.8	9.77	0.313 7	0.324	14.767 5	2.937

表 2 等效蜂窝芯材料参数

Table 2 Material parameters of the equivalent haneycomb core					
E_x/GPa	E_z/GPa	ν_{xy}	ν_{xz}	G_{xy}/GPa	G_{yz}/GPa
3.43×10^{-3}	2.99	1	3.79×10^{-4}	0.86×10^{-3}	0.413

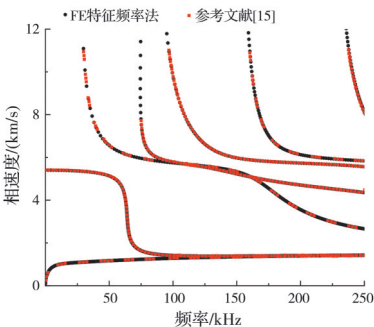


图 5 相速度频散曲线对比

Fig. 5 Comparison of phase velocity dispersion curves

绘制 HSP 结构的频散曲线简捷且有效。

1.4 HSP 结构频散曲线与特点分析

由于铝制 HSP 结构在工程中应用较普遍,故以铝制 HSP 结构为研究对象,其材料和几何参数分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 铝制 HSP 结构的材料参数

Table 3 Material parameters of the aluminum HSP structure		
E/GPa	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	泊松比
70	2 700	0.33

表 4 铝制 HSP 结构的几何参数

Table 4 Geometric parameters of the aluminum HSP structure			
蜂窝芯高度/mm	蒙皮高度/mm	蜂窝芯边长/mm	蜂窝芯壁厚/mm
10	1	5	0.08

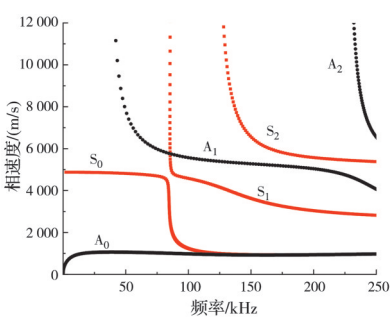
由式(1)和式(2)计算得到蜂窝芯等效材料参数,如表 5 所示。蜂窝芯等效密度为 $49.88\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

表 5 蜂窝芯等效参数

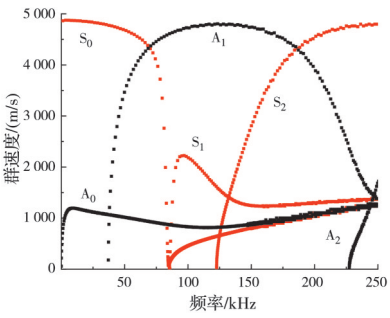
Table 5 Equivalent parameters of the honeycomb core					
E_x/MPa	E_z/MPa	ν_{xy}	ν_{xz}	G_{xy}/MPa	G_{yz}/MPa
0.662	1 293.26	0.999	4.09×10^{-6}	0.248	243.095

经过计算,得到铝制 HSP 结构的相速度和群速度频散曲线,如图 6 所示。

由图 6 可知,导波除了频散特性外,还具有多模态特性。在 37.14 kHz 时出现 A_1 模态,71 kHz 时 S_0



(a) 相速度



(b) 群速度

图 6 铝制 HSP 结构的频散曲线

Fig. 6 Dispersion curves of the aluminum HSP structure

和 A_1 波速相同,模态重叠。86 kHz 时出现 S_1 模态与 S_2 模态重叠。122 kHz 时出现 S_2 模态,227 kHz 时出现 A_2 模态。可见,HSP 结构的频散曲线具有如下特点:

- 1)除 A_0 和 S_0 模态外,其他模态都存在截止现象,即在截止频率以下该模态不存在,在截止频率以上存在。
- 2)在某频率下会同时存在多个模态,各个模态的波速各不相同,频率越高,多模态特性越明显。
- 3)各个模态都存在频散现象,群速度随频率的变化而变化。除 S_0 模态外,普遍存在波速随频率增大而先增大后减小的变化趋势。

2 高频导波波动性能分析

为了验证 HSP 结构等效模型波动性能的适用性和脱粘分层对传感信号的影响,采用 Abaqus 建立未经等效处理的实体 FE 模型,模拟导波在 HSP 结构中的传播过程。为此,建立一个实体 FE 模型并验证其有效性。考虑到 HSP 结构的代表性,采用市场上广泛使用的 HSP 结构类型。另外,在选择激发信号频率时确保其波长在蜂窝芯高度同一个量级内,以保证 Lamb 波波动性能的相似性和结果的普适性。

2.1 FE 模型的建立与分析

为了便于对比等效前后模型的异同,在建立 FE 模型时采用与表 3 和表 4 相同的物理和几何参数,仅蜂窝芯有所不同,按实际形状和尺寸建模。此

外,选取PZT作为换能器,实体HSP结构与PZT换能器布置示意图如图7所示。利用结构的对称性,FE模型取原结构的一半,并采用对称边界条件。利用Abaqus建立的HSP结构FE模型如图8所示。

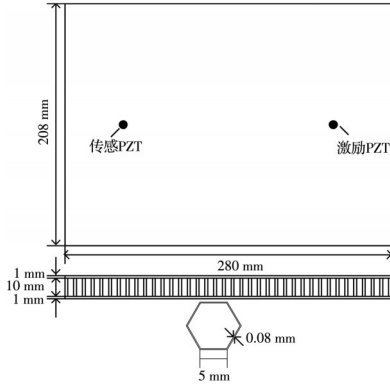


图7 HSP结构与PZT换能器布置示意图

Fig. 7 Schematic of the HSP structure and layout of PZT transducers

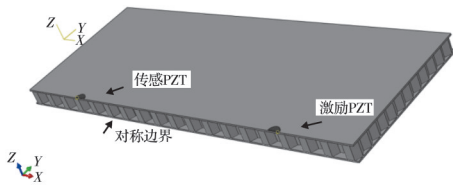


图8 HSP结构FE模型

Fig. 8 FE model of the HSP structure

铝制HSP结构的网格单元类型为C3D8R,PZT网格单元类型为C3D8E。由于蒙皮、PZT和蜂窝芯之间均为胶结(位移和应力连续),故蒙皮、PZT和蜂窝芯采用“绑定”约束进行连接。在PZT作动器的顶部节点上施加激发电压,在PZT作动器和传感器的底部节点上赋零电压。在仿真中,作动器与传感器的距离为170 mm。PZT的介电耦合矩阵为

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 8.11 & 0 & 0 \\ 0 & 8.11 & 0 \\ 0 & 0 & 7.53 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \text{ CV}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

压电应力矩阵为

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -5.4 \\ 0 & 0 & -5.4 \\ 0 & 0 & 15.8 \\ 12.3 & 0 & 0 \\ 0 & 12.3 & 0 \end{bmatrix} \text{ C/m}^2$$

刚度矩阵为

$$c = \begin{bmatrix} 12.1 & 7.54 & 7.52 & 0 & 0 & 0 \\ 7.54 & 12.1 & 7.52 & 0 & 0 & 0 \\ 7.52 & 7.52 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.26 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ Pa}$$

PZT的密度为 $7\,700 \text{ kg/m}^3$ 。HSP结构和PZT换能器的几何参数如表6所示,HSP结构的材料参数如表3所示。

表6 HSP结构和PZT换能器的几何参数

Table 6 Geometric parameters of the HSP structure and PZT transducers

单位:mm							
蒙皮			蜂窝芯			PZT片	
长度	宽度/2	厚度	边长	壁厚	高度	直径	厚度
280	104	1.0	5	0.08	10	8	0.5

另外,考虑到动态模拟的收敛性,结构的网格应足够精细,使得沿波传播方向每波长至少存在10个单元^[16]。当中心频率 f_c 为100 kHz时, $c_g^{A_0}$ 为 A_0 模式的群速度,最小波长为

$$\lambda_{\min} = \frac{c_g^{A_0}}{f_c} = \frac{831}{100\,000} \text{ mm} = 8.31 \text{ mm}$$

因此,网格长 L 为

$$L \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} = 0.831 \text{ mm}$$

取网格长度为0.831 mm。

积分时间步长也应足够小,以解决结构的频率响应问题。时间步长应小于工作频率下最快的波在一个网格内的传播时间。因此,时间步长为

$$\Delta t \leq \frac{L_{\min}}{c_g^{A_1}} = \frac{8.31}{4\,724} \mu\text{s} = 0.18 \mu\text{s}$$

取时间步长为0.15 μs 。

为抑制HSP结构中导波传播能量的衰减以及尽可能减少激励信号的频散现象,采用5周期窄带脉冲信号作为激励信号,其形式为^[17]

$$V = \left[H(t) - H\left(t - \frac{5}{f_c}\right) \right] \left(1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{t} \right) \sin(2\pi f_c t) \quad (5)$$

式中: f_c 为中心频率; $H(t)$ 为Heaviside阶跃函数。中心频率为100 kHz时,归一化后激励信号的时域波形图如图9所示。

经过计算,可以得到HSP结构的时域传感信

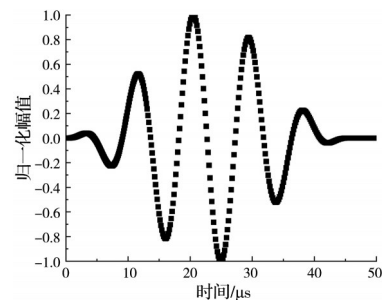


图9 激励信号的时域波形

Fig. 9 Time-domain waveform of the excitation signal

号,如图 10 所示。由相应的频散曲线(如图 6 所示)可知,传感信号中存在多种 A 和 S 模态,辨识每个波包对应的模态类型对掌握导波的波动行为十分重要。通过计算飞行时间(time of flight, ToF)得到各模态的出现时间,可以辨认出图 10 中各波包对应的模态及其来源。

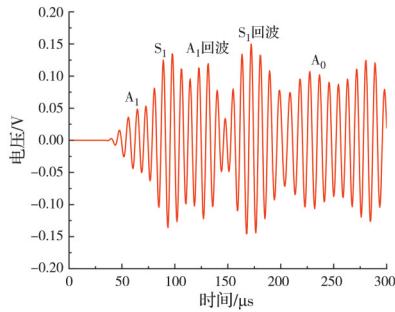


图 10 HSP 结构中的时域传感信号

Fig. 10 Time-domain sensing signal in the HSP structure

图 10 表明, HSP 结构中存在对称 S 和反对称 A 两种模态的导波, 包括直达波和反射波两种方式。

2.2 等效换算法的频率范围

由 HSP 结构的等效原则可知, 等效处理仅能保证等效前后的结构变形相同, 由此确保力学性能相近, 但需要进一步论证波动行为是否一致。由于均质薄板中导波的频散特性与频厚积有关, 因此, 在板厚相同的前提下, 激发信号的频率将成为关键影响因素。为此, 分别激发不同频率的监测信号并对比等效 HSP 结构与实际 HSP 结构传感信号的异同, 以此判断等效模型的适用性和频率适用范围。

选择激励信号的中心频率为 30 kHz, 对比实际 HSP 结构与等效 HSP 结构的时域信号, 结果如图 11 所示。由图 11 可见, 两者归一化后的时域信号几乎一致, 说明低频率下的导波在实际 HSP 结构中的传播方式与在等效介质中相同。

当中心频率 $f_c = 30$ kHz 时, 最小波长为 36 mm, 约为蜂窝芯边长(5 mm)的 7 倍, 可以忽略蜂窝芯几何形状的影响(简称蜂窝芯效应)。

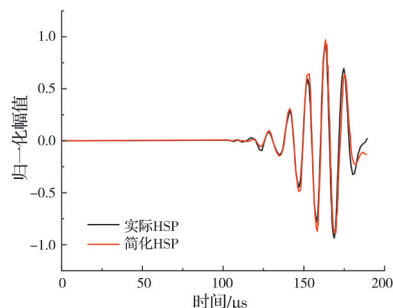


图 11 实际 HSP 结构和等效 HSP 结构的时域信号对比 ($f_c = 30$ kHz)

Fig. 11 Comparison of time-domain sensing signals of actual HSP and equivalent HSP structures ($f_c = 30$ kHz)

当中心频率为 40 kHz 时, 实际 HSP 结构和等效 HSP 结构时域传感信号对比如图 12 所示。由图 12 可见, 虽然波形类似, 但相位和幅值有明显差异。此时, 最小波长约为 26 mm, 与蜂窝芯边长更接近, 说明在 40 kHz 频率下导波的传播方式已受到蜂窝芯效应的影响, 将蜂窝芯等效成均匀介质的方法影响了波动行为。

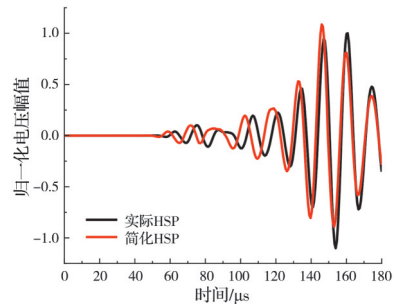


图 12 实际 HSP 结构和等效 HSP 结构的时域传感信号对比 ($f_c = 40$ kHz)

Fig. 12 Comparison of time-domain sensing signals of actual HSP and equivalent HSP structures ($f_c = 40$ kHz)

同理, 以 100 kHz 作为激励信号的中心频率, 该频率下最小波长为 4.6 mm, 此时波长与蜂窝芯边长(5 mm)几乎相当。两种 HSP 结构的时域传感信号对比如图 13 所示, 两者存在较大差异, 说明等效 HSP 模型不能用于表征导波的波动行为。

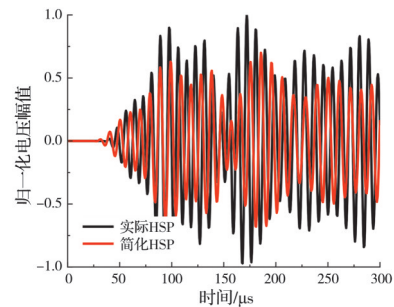


图 13 实际 HSP 和等效 HSP 的时域信号对比 ($f_c = 100$ kHz)

Fig. 13 Comparison of time-domain signals of actual HSP and equivalent HSP ($f_c = 100$ kHz)

通过对比 $0 < f_c < 100$ kHz 范围内等效 HSP 结构与实际 HSP 结构的传感信号, 得到经验性规律, 当满足式(6)时, 等效 HSP 结构不宜用于表征实际 HSP 结构的波动规律

$$\lambda < 5l \quad (6)$$

式中: λ 为导波的最小波长; l 为蜂窝芯单胞边长。

2.3 高频激励导波的波动性能

以 30 kHz 作为激励信号的中心频率, 通过计算得到实际 HSP 结构模型某时刻位移场的分布, 如图 14 所示。由图 14 可见, 导波沿着整个 HSP 结构传播。

同理, 以 100 kHz 作为激励信号的中心频率, 其

图14 中心频率 $f_c = 30$ kHz时的位移快照Fig. 14 Displacement snapshot at the central frequency $f_c = 30$ kHz

位移场快照如图15所示。由图15可见,变形主要发生在上蒙皮内,在该频率下导波主要沿上蒙皮传播,并有少量导波泄露到蜂窝芯。该频率下最小波长为4.6 mm,此时波长与蜂窝芯边长(5 mm)几乎相当,蜂窝芯效应给导波的传播方式带来了极大的影响。

图15 中心频率 $f_c = 100$ kHz时的位移快照Fig. 15 Displacement snapshot at the central frequency $f_c = 100$ kHz

当中心频率为100 kHz时,导波的传播伴随着漏波现象,如图16所示,交界处位移连续且主要集中在上蒙皮,其中一部分导波透射进入蜂窝芯,形成漏波,导致传感信号变弱。

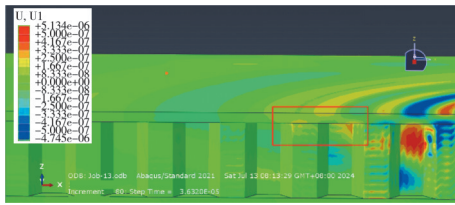


图16 HSP位移场快照

Fig. 16 Snapshot of the displacement field of the HSP structure

高频激励导波在HSP结构中的传播有如下特点:

- 1) 波长小于等于蜂窝芯边长时,蜂窝芯几何形状给导波传播带来不可忽略的影响。
- 2) 高频导波主要沿上蒙皮传播,并伴随一定的漏波现象。
- 3) 漏波现象导致导波能量泄露,时域传感信号的幅值减弱。

2.4 脱粘分层对导波波动性能的影响

为了阐明HSP结构中局部脱粘分层对导波波动性能的影响,通过解除FE模型中上蒙皮与蜂窝

芯的部分绑定约束来模拟脱粘分层,FE模型如图17所示。通过对比传感信号变化,提取脱粘分层特征相关的信息,以此说明脱粘分层与传感器信号幅值的关系。

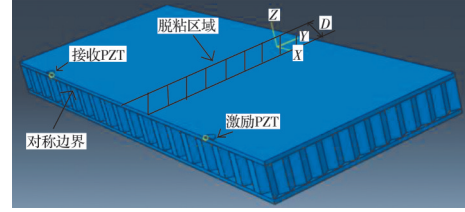


图17 HSP结构有限元模型示意图

Fig. 17 Schematic of the FE model of the HSP structure

计算结果表明,当蒙皮和蜂窝芯粘结良好时,交界处位移连续且位移主要集中在上蒙皮,位移场快照如图18所示。

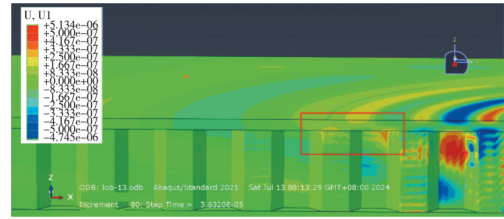


图18 粘结良好板位移场快照

Fig. 18 Snapshot of the displacement field of the well-bonded panel

然而,当出现局部脱粘分层时,蜂窝芯和蒙皮处的位移不连续,局部脱粘板位移场快照如图19所示。当上层蒙皮和蜂窝芯交界处位移连续时,导波会直接“漏”到蜂窝芯中。当上层蒙皮和蜂窝芯交界处存在脱粘分层时,因该区域位移不连续,导致上层蒙皮和蜂窝芯的导波出现“分流”现象,分别通过上层蒙皮和蜂窝芯向前传播,然后再汇合。

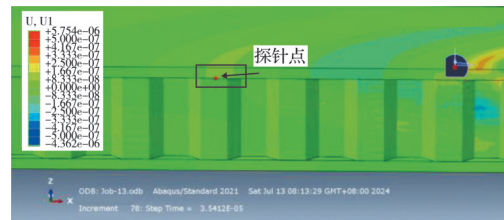


图19 脱粘板位移场快照

Fig. 19 Snapshot of the displacement field of the debonded panel

为了详细说明“分流”现象,取出脱粘区域探针点处上下界面位移并进行对比,如图20所示,波动行为因位移不连续发生显著变化。

分流现象给时域传感信号造成显著影响,如图21所示。结合各模态波包出现的时间可知,当出现脱粘分层时, A_0 模态的幅值会显著增大,且脱粘区域越大, A_0 模态幅值越大。 A_0 模态对脱粘分层最敏

感, A_0 模态的幅值变化可以作为评估脱粘分层的重要依据。

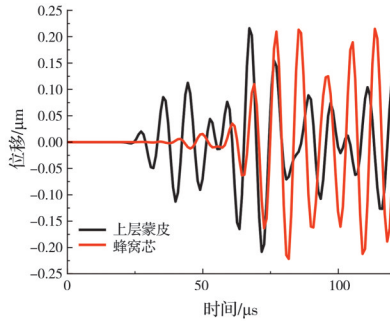


图 20 脱粘区域上下界面位移的对比

Fig. 20 Comparison of displacements of the upper and lower interfaces in the debonding region

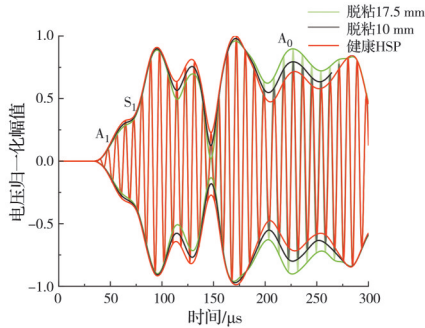


图 21 无脱粘板与脱粘传感信号的对比

Fig. 21 Comparison of sensing signals between bonded and debonded panels

3 频散特性与波动行为的试验验证

3.1 试验目的与试验系统

为了验证等效模型的适用性和脱粘分层造成的高频导波在 HSP 中传播的分流现象和信号幅值减弱现象,搭建试验系统,试验对象为一个 HSP 试件,如图 22 所示。试件的长和宽均为 360 mm,不小于 10 倍的波长 (36 mm),以减小边界反射造成的混叠现象,其他几何参数和材料参数详见表 3 和表 4。虽然蒙皮和铝制蜂窝芯材由市场购买并通过粘接形成 HSP 结构,但考虑到 Lamb 波的波长与蜂窝芯尺度的适配性,通过合理选择激发波长以保证 Lamb 波波动性能的一致性。在试件中心处预制局部圆形脱粘分层区域,其圆心坐标为 (180 mm, 180 mm),直径为 20 mm。在制作试件时,脱粘分层区域采用不涂胶并覆盖一层薄膜的方式实现。试件和 PZT 换能器的几何参数如表 6 所示, PZT 阵列的布置如图 22 所示。

试验系统由示波器 (RIGOL-DS1102E)、信号发生器 (RIGOL-DG1022)、信号放大器 (Aigtek ATA-2021B)、计算机和若干 PZT 换能器 (PZT-5) 和 HSP 试件组成,如图 23 所示。

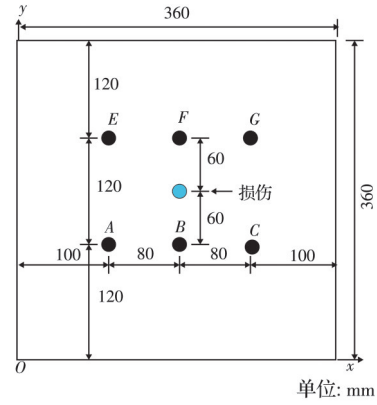


图 22 HSP 结构与 PZT 阵列布置

Fig. 22 HSP structure and PZT array arrangement

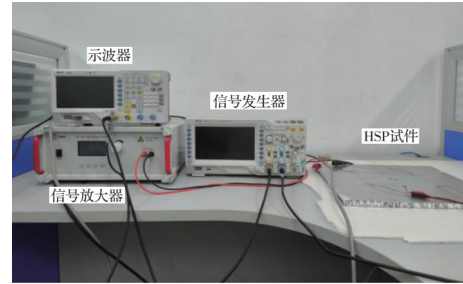


图 23 试验装置

Fig. 23 Test setup

3.2 试验方法

用信号发生器产生中心频率为 100 kHz 的 5 周期窄带脉冲信号,如式 (5) 所示,经放大器放大后 (放大系数为 5.0) 分别激励 PZT 列阵中的 A、B 和 C 作动器。激励产生的导波在试件中传播,通过 PZT 列阵中的 E、F 和 G 传感器同时接收,并将传感信号存储在示波器中。

3.3 试验结果分析

在激发-接收路径 B-F 上,导波经过了一段“分流”的脱粘分层区域。而路径 A-E 粘结良好,可以认为 A-E 相较 B-F 泄漏了更多的导波。二者的对比如图 24 所示。同样,根据群速度曲线,可以判断出各波包对应的模式。

由图 24 可知,分流会使信号幅值减弱,其中 A_0 模态幅值显著减少。因此,高频导波在试件中伴随

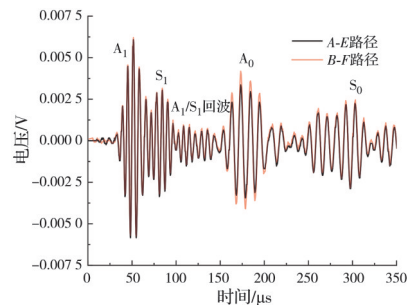


图 24 脱粘与健康 HSP 的时域信号对比

Fig. 24 Comparison of time-domain signals between debonded and undebonded HSPs

漏波现象,漏波现象导致信号幅值减弱。

3.4 理论波速的验证

为了验证理论上导波传播速度的正确性,需要通过实测传感信号得到指定距离下的传播时间,然后通过 ToF 法估算实测导波群速度,并对比理论值和实测值的差异。为此,利用 Hilbert 法绘制 A-E 路径传感信号和激励信号的包络线,如图 25 所示。

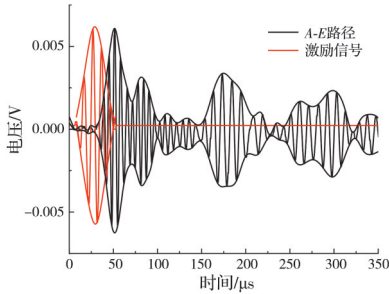


图 25 激励信号与传感信号的对比

Fig. 25 Comparison of the excitation and sensing signals

各模态对应的群速度为

$$c_g = \frac{L}{\Delta t} \quad (7)$$

式中: L 为路径长度,即指定的两个换能器之间的距离; Δt 为一激励信号峰值与接收信号峰值之间的时间间隔。当 $f_c=100\text{ kHz}$ 时,群速度的计算结果如表 7 所示。

表 7 $f_c=100\text{ kHz}$ 时的群速度对比

Table 7 Group velocity comparison at $f_c=100\text{ kHz}$

模态	试验群速度/(m/s)	理论群速度/(m/s)	误差/%
A_1	4 893	4 724	3.4
S_1	2 319	2 209	4.7
A_0	819	831	1.5
S_0	449	458	2.0

分别以 100、150、200、250 kHz 激励信号计算 A_0 模态飞行时间,以绿色点标记在图 26 中,计算结果如表 8 所示。

由表 7 和表 8 可知,群速度理论值和实测值的误差不超过 5%,表明利用夹芯板理论简化蜂窝芯

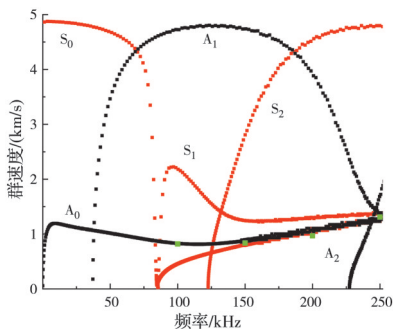


图 26 HSP 结构的频散曲线

Fig. 26 Dispersion curves of HSP structure

表 8 A_0 模态群速度对比

Table 8 Group velocity comparison of the A_0 mode

激发频率/Hz	试验群速度/(m/s)	理论群速度/(m/s)	误差/%
100	819	831	1.5
150	836	867	3.6
200	1 015	1 067	4.8
250	1 294	1 267	2.1

和特征频率法相结合的方法可以绘制出 HSP 结构的准确频散曲线。

4 结论

- 1) 采用夹芯板理论简化 HSP 结构,再使用有限元特征频率法绘制频散曲线的方法简单且准确。
- 2) 当最小波长小于 5 倍蜂窝芯边长时,导波在等效 HSP 结构中的波动行为与实际结构中有一定差异。因此,不建议在高频时($\lambda < 5l$)使用等效 HSP 结构分析导波波动行为。
- 3) 导波在低频($\lambda \geq 5l$)时沿整个 HSP 截面传播,在高频($\lambda < 5l$)时主要沿上蒙皮传播。
- 4) 高频导波在 HSP 结构中传播时伴随着漏波现象,导致时域信号幅值减弱。
- 5) 局部脱粘分层造成传感信号中 A_0 模态幅值的增加,可作为特征识别 HSP 结构的局部脱粘分层。

参考文献

[1] 李叙生. 胶接铝蜂窝及其夹层结构件的制造[J]. 战术导弹技术, 1980(4): 52-56.
Li X S. Manufacture of bonded aluminum honeycomb and its sandwich structure[J]. Tactical Missile Technology, 1980(4): 52-56. (in Chinese)

[2] Goswami S, Becker W. The effect of facesheet/core delamination in sandwich structures under transverse loading[J]. Composite Structures, 2001, 54(4): 515-521.

[3] 刘涛, 赵博, 曹文萍, 等. 铝蜂窝板缺陷的脉冲红外热成像检测[J]. 机械工程师, 2020(6): 14-16.
Liu T, Zhao B, Cao W P, et al. Detection of defects in aluminum honeycomb by pulse infrared thermography[J]. Mechanical Engineer, 2020(6): 14-16. (in Chinese)

[4] 刘立胜, 廖良进, 李江, 等. 海洋工程领域数字射线 CR 与射线胶片检测技术的对比分析[J]. 无损检测, 2023, 45(9): 1-4.
Liu L S, Liao L J, Li J, et al. Comparison and analysis of computed radiography and film radiography in offshore engineering field[J]. Nondestructive Testing Technology, 2023, 45(9): 1-4. (in Chinese)

[5] 陈韩青, 徐志远, 屈仲毅, 等. 蜂窝夹层结构无损检测方法研究综述[J]. 材料导报, 2024, 38(10): 296-310.

- Chen H Q, Xu Z Y, Qu Z Y, et al. Review of nondestructive testing methods for honeycomb sandwich structures[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(10): 296-310. (in Chinese)
- [6] 李宗权, 张胜兰, 杨稳. 铝蜂窝夹层结构等效模型在低速冲击仿真中的应用[J]. *湖北汽车工业学院学报*, 2022, 36(3): 9-12, 17.
Li Z Q, Zhang S L, Yang W. Application of aluminum honeycomb sandwich structure equivalent model in low-velocity impact simulation[J]. *Journal of Hubei University of Automotive Technology*, 2022, 36(3): 9-12, 17. (in Chinese)
- [7] Thomson W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. *Journal of Applied Physics*, 1950, 21(2): 89-93.
- [8] 张海燕, 刘镇清, 吕东辉. 全局矩阵法及其在层状各向异性复合板中 Lamb 波传播特性研究中的应用[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(2): 111-116.
Zhang H Y, Liu Z Q, Lü D H. Global matrix and its application to study on Lamb wave propagation in layered anisotropic composite plates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(2): 111-116. (in Chinese)
- [9] 霍宇森. 超声导波传播的半解析有限元分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
Huo Y S. Research on semi-analytical finite element analysis of ultrasonic guided wave propagation characteristics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [10] 张林文, 马世伟, 程茜. 基于有限元特征频率法的各向异性复合板 Lamb 波特性的分析[J]. *无损检测*, 2017, 39(4): 67-71.
Zhang L W, Ma S W, Cheng Q. Lamb wave characteristic analysis of anisotropic multilayer composite using finite element intrinsic frequency method[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2017, 39(4): 67-71. (in Chinese)
- [11] Baid H, Schaal C, Samajder H, et al. Dispersion of Lamb waves in a honeycomb composite sandwich panel [J]. *Ultrasonics*, 2015, 56: 409-416.
- [12] 张林文. 板结构材料中超声兰姆波信号传播特性的理论与实验研究[D]. 上海: 上海大学, 2017.
Zhang L W. Theoretical and experimental study on propagation characteristics of ultrasonic Lamb wave signal in plate[D]. Shanghai: Shanghai University, 2017. (in Chinese)
- [13] 李尧臣, 聂国隽, 杨昌锦. 面内功能梯度矩形板的近似理论与解答[J]. *力学学报*, 2013, 45(4): 560-567.
Li Y C, Nie G J, Yang C J. Approximate theory and analytical solution for rectangular plates with in-plane stiffness gradient[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(4): 560-567. (in Chinese)
- [14] 顾鑫, 许伯强, 徐桂东, 等. 基于 Bloch-Floquet 理论和有限元仿真的板结构 Lamb 波复频散关系研究[J]. *电子科技*, 2023, 36(8): 49-55.
Gu X, Xu B Q, Xu G D, et al. Study of Lamb-wave complex dispersion relations for plate structures based on Bloch-Floquet theory and finite element simulation[J]. *Electronic Science and Technology*, 2023, 36(8): 49-55. (in Chinese)
- [15] Samajder H, Baid H, Ricci F, et al. Lamb waves in a honeycomb composite sandwich plate[J]. *Health Monitoring of Structural and Biological Systems* 2013, 2013, 8695: 869505.
- [16] Buddala R R, Soman R, Tallur S, et al. Multi-stage guided wave technique for estimating the shape and size of multiple damages in honeycomb sandwich structures [J]. *Measurement*, 2025, 247: 116724.
- [17] Mitra A K, Mehta M K, Aradhye A A, et al. Damage imaging in aircraft structures using low-frequency elastic guided waves[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 229: 112539.

(编辑 胡英奎)